能源革命中的物理储能技术

陈海生[1,2*]　凌浩恕[1]　徐玉杰[1,2]

1 中国科学院工程热物理研究所　北京　100190
2 中国科学院大学　北京　100049

摘要　促进储能技术与产业的健康发展，对于提高可再生能源比例、保障能源安全、提高能源利用效率、推动能源革命具有重大的战略意义。物理储能作为最重要的一种储能方式，得到了国内外广泛关注。文章剖析了物理储能技术的重大需求，总结了国内外物理储能技术与产业发展现状与趋势，比较了国内外物理储能技术发展水平，明确了物理储能技术发展问题与挑战，并提出了相应发展建议，旨在为我国物理储能技术和产业的研究与发展提供详实的参考。

关键词　储能，物理储能，抽水蓄能，压缩空气储能，飞轮储能，超导储能，物理储热

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.010

1 物理储能技术的重大战略需求

新一轮的世界能源技术革命正在兴起，推动着能源结构的转型，重塑着能源的格局[1]。构建绿色、低碳、清洁、高效、安全的能源体系是世界能源发展理念和主要方向[2]。我国能源生产和消费总量均已居世界前列，但仍存在能源结构不合理、能源利用效率不高、可再生能源利用比例低、能源安全利用水平有待进一步提高等问题。因此，推进能源改革，发展“绿色、低碳、清洁、高效、安全”的能源技术势在必行。2014 年 6 月，习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议上提出了推动能源消费革命、能源供给革命、能源技术革命、能源体制革命和全方位加强国际合作的“四个革命、一个合作”的五方面要求[3]，确立了我国能源安全发展的行动纲领。

促进储能技术与产业的健康发展，对提高能源利用效率、增加可再生能源利用比例、保障能源安全、推动能源革命具有重大的战略意义[4]。2017 年 10 月，国家发展改革委等五部门联合印发《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》[5]，指出：“储能是智能电网、可再生能源高占比能源系统、‘互联网+’智慧能源的重要组成部分和关键支撑技术。储能可为电网运行提供调峰、调频、备用、黑启动、需求响应支

*通讯作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21070200），“973”计划（2015CB251302），中国科学院前沿科学重点研究项目（QYZDB-SSW-JSC023），英国皇家学会牛顿高级学者项目（NA170093）
修改稿收到日期：2019年4月1日

撑等多种服务，是提升传统电力系统灵活性、经济性和安全性的重要手段；储能可显著提高风、光等可再生能源的消纳水平，支撑分布式电力及微网，是推动主体能源由化石能源向可再生能源更替的关键技术；储能可促进能源生产消费开放共享和灵活交易、实现多能协同，是构建能源互联网，推动电力体制改革和促进能源新业态发展的核心基础。”

物理储能一般包括物理储电和物理储热两大类，具体的储能技术如图 1 所示[6-10]。物理储能具有规模大、成本低、寿命长、环保等特点，具有广阔的应用领域和巨大的发展潜力[11]。我国对物理储能的发展非常重视，科学技术部、国家能源局、中国科学院以及各级地方政府等均对物理储能的发展进行了重要部署（表 1）。由此可见，物理储能技术与产业的研究发展具有重要战略意义。

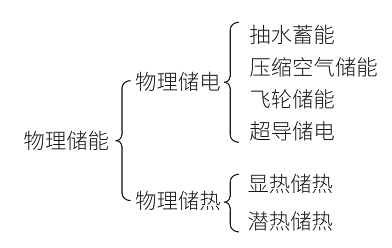


图 1　物理储能种类

2 国内外物理储能技术发展现状

据中关村储能产业技术联盟（CNESA）项目库统计[12]，截至 2018 年，全球已投运储能系统累计装机规模为 180.9 GW，相比 2017 年增长 3%。其中：抽水蓄能的累计装机规模最大，为 170.7 GW，同比增长 1.0%；熔融盐储热的累计装机规模为 2.8 GW，同比增长 8%（图 2a）。截至 2018 年，中国已投运储能系统累计装机规模为 31.2 GW，相比 2017 年底增长 8%。其中：抽水蓄能的累计装机占比最大，为 96%，同比增长 5%；熔融盐储热的累计装机规模为 220 MW，占比为 0.7%（图 2b）。

表 1　我国物理储能相关的战略规划与指导意见

	名称	重点任务
1	国家能源局《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》	10 MW/100 MWh级超临界压缩空气储能系统、10 MW/1000 MJ级飞轮储能阵列机组、100 MW级锂离子电池储能系统、大容量新型熔盐储热装置、应用于智能电网及分布式发电的超级电容电能质量调节系统等
2	国家能源局《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》	太阳能光热高效利用高温储热技术、分布式能源系统大容量储热（冷）技术，面向电网调峰提效、区域供能应用的物理储能技术，面向可再生能源并网、分布式及微电网、电动汽车应用的储能技术
3	国家能源局《能源技术创新“十三五”规划》	10 MW/100 MWh 先进压缩空气储能系统示范、2.5 MW/5 MJ 高温超导储能装置研制、新型高效储能材料技术开发
4	国家能源局《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》	发展可变速抽水蓄能技术，推进飞轮、高参数高温储热、相变储能、新型压缩空气等物理储能技术的研发应用
5	《“十三五”规划100个重大项目表》	发展储能与分布式能源
6	国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项	10 MW级先进压缩空气储能技术，海水抽水蓄能电站前瞻技术研究，MW级先进飞轮储能关键技术研究
7	《北京市科技计划“十三五”规划》重大课题	10 MW超临界压缩空气储能系统（已立项）
8	《中国科学院“十三五”发展规划纲要》	有望实现创新跨越60项重大突破：压缩空气储能

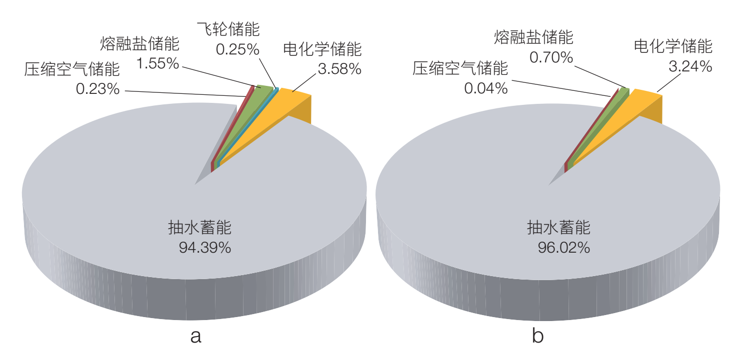


图 2 储能装机构成

（a）全球；（b）中国；数据来源：CNESA 项目库，2019 年

2.1 物理储能技术发展现状与趋势

2.1.1 抽水蓄能

抽水蓄能利用电能和水势能的相互转化进行能量存储，具有效率高、容量大、寿命长、储能周期不受限制等优点，是目前技术最成熟、应用最广泛的电力储能技术[13]。但是，由于抽水蓄能需要建造水库和水坝，其应用受地理条件的限制[14]。表 2 为抽水蓄能技术特征，典型抽水蓄能电站规模为 100—3000 MW，主要适用于电力系统调频、调峰填谷、能量管理、备用等方面。

抽水蓄能技术自从 1882 年国际第一座抽水蓄能电站在瑞士使用以来，已经发展近 130 多年，技术已经成熟。目前世界上在运营的最大抽水蓄能电站是 1985 年投入运行的美国巴斯康蒂抽水蓄能电站，装机容量达到 30.03 MW[15]。

我国的抽水蓄能技术研发与建设起步较晚，1968 年首次在河北省岗南水电站引进 2 台日本制造的单机 11 MW 混合式抽水蓄能机组。经过 50 余年的发展，我国抽水蓄能已从引进、吸收消化阶段转变为自主研发阶段。2016 年 6 月投入商业运行的浙江仙居抽蓄电站机组是我国真正意义上第一台完全自主设计、自主生产、自主安装运营的设备，也标志着我国打破国外的技术垄断，完整掌握大型抽水蓄能电站核心技术。

总体来说，抽水蓄能技术正朝着大容量、高水头、高效率、智能化方向发展，具体关键技术包括：高水头大功率水泵水轮机、高转速大功率发电机、变速调节控制、无人化智能控制与集中管理、信息化施工、隧道掘进机开挖技术、新型钢材和沥青混凝土技术等。

2.1.2 压缩空气储能系统

传统压缩空气储能系统是基于燃气轮机技术，利用电能和空气内能进行能量储存的系统。传统压缩空气储能系统具有容量较大、周期长、寿命长、投资相对小等优点，但由于其不是一项独立的技术，必须同燃气轮机电站配套使用，依赖燃烧化石燃料提供热源，且依赖大型储气室，如岩石洞穴、盐洞、废弃矿井等，因此应用也受到地理条件的限制[16]。表 3 为压缩空气储能技术特征，可见，压缩空气储能系统与抽水蓄能技术特性相似，其应用领域与抽水蓄能也相同。

传统压缩空气储能技术自从 1949 年 Stal Laval 提出利用地下洞穴实现压缩空气储能以来，国际上只有两座大规模传统压缩空气储能电站投入商业运行，

表 2 抽水蓄能技术特征

技术成熟度	功率（MW）	寿命（年）	效率（%）	响应速度	功率成本（元/kW）	能量成本（元/kWh）	能量密度（Wh/L）
商用	100—3 000	40—60	65—75	分钟级	3 000—5 000	500—1 000	0.2—2

表 3 压缩空气储能技术特征

技术名称	技术成熟度	功率（MW）	寿命（年）	效率（%）	响应速度	功率成本（元/kW）	能量成本（元/kWh）	能量密度（Wh/L）
传统压缩空气	商用	1—300	30—50	40—54	分钟级	6 000—8 000	1000—2500	3—10
新型压缩空气	示范-商用	1—100	30—50	40—70	分钟级	6 000—8 000	1000—2500	3—100

分别是德国的290 MW Huntorf电站和美国的110 MW McIntosh电站[17]。此外，日本建设2 MW传统压缩空气储能示范电站。我国只进行了传统压缩空气储能技术相关理论研究。

传统压缩空气储能系统存在依赖大型储气洞穴、依赖化石燃料两大技术瓶颈，严重限制了其推广应用。近年来，为解决上述技术瓶颈，国内外学者开发了多种新型压缩空气储能系统。目前国际上已经实现MW级示范的系统包括：美国SustainX公司等温压缩空气储能系统、美国General Compression公司蓄热式压缩空气储能系统、英国Highview公司液态空气储能系统[18]。国内，中国科学院工程热物理研究所于2009年在国际上首次提出超临界压缩空气储能系统[19]，并研制了国际首套1.5 MW和10 MW示范系统，系统效率高于全球所有同等规模系统的效率，并且已实现产业化，目前正在开展100 MW级系统技术研发与示范。

压缩空气储能技术正朝着不依赖化石燃料、不依赖大型储气室、提高系统效率方向发展，主要通过提高关键部件技术性能、优化系统集成与控制技术等手段来实现，具体关键技术包括宽负荷压缩机技术、高负荷膨胀机技术、高效蓄热技术、储气技术和系统集成与控制技术等。

2.1.3 飞轮储能

飞轮储能是利用电能和飞轮动能相互转化的能量存储形式，具有单机功率大、效率高、循环寿命长、响应速度快等优点[20]，具体技术性能见表4。该技术适用于调频、调峰、移动应急电源（EPS）和不间断电源（UPS）等领域。

国外发达国家已经出现了很多高性能的飞轮储能产品。美国进展最快：美国Active Power公司的100—2000 kW UPS、Pentadyne公司的65—1000 kVA UPS、Beacon Power公司的25 MW Smart Energy Matrix、波音公司高温超导磁浮轴承的100 kW/5 kWh飞轮储能，以及SatCon Technology公司的315—2200 kVA UPS等产品已经应用于电力系统稳定控制、电力质量改善和电力调峰和风力发电全频调峰等领域[21]。在高温超导飞轮储能系统的研制方面，美国波音、德国ATZ等公司处在世界前列，日本ISTEC和韩国KEPRI也进行了卓有成效的研究[22]。我国飞轮储能处于关键技术突破阶段，与国外先进技术水平差距有5—10年[23]，且多与其他储能方式配合使用 。

飞轮储能正朝着增加飞轮单机与单元储能容量、增加功率、提高效率的方向发展，其关键技术包括先进复合材料飞轮技术、高速高效电机技术、磁悬浮轴承技术、飞轮阵列技术等。

2.1.4 超导储能

超导储能系统是目前唯一能将电能直接存储为电流的储能系统，具有响应速度快、效率高，以及有功和无功输出、可灵活控制等优点[24]，表5为超导储能技术特征，主要应用于提高电网的电能质量领域。

自1969年法国Ferrier提出超导储能以来，只有美国等少数国家开发出商业性产品，日本、德国等国家开发出原理样机。美国已有6台3 MJ/8 MVA小

表4　飞轮储能技术特征

储能量（MJ）	功率（kW）	转速（kr/min）	循环效率（%）	待机损耗（kW）	循环寿命（次）	使用年限（年）	环境影响
2—360	10—3 000	3—50	80—95	0.3—20	≥106	≥15	微

表5　超导储能技术特征

技术成熟度	寿命（年）	效率（%）	响应速度	功率成本（元/kW）	能量成本（元/kWh）	能量密度（Wh/L）
试验-示范	20+	＞95	毫秒级	6 500—7 000	~90 000	~6

型超导储能系统成功地安装在威斯康星州公用电力的北方环型输电网[25]。德国公司 ACCEL Instrument GmbHh 和 EUS GmbH 联合开发了 2 MJ 超导磁体用于实验室的 UPS 系统。日本 Chubu Electric Power 公司和国家能源开发组织启动了一项 10 MW/19 MJ 超导储能装置研发项目[26]。

我国较早地开展了超导储能的基础理论和关键技术研究，并取得了显著成果。中国科学院电工研究所于 2008 年完成 1 MJ/0.5 MVA 高温超导储能系统的研制，并在甘肃白银实施了世界首座超导变电站限流-储能示范工程，其具有目前世界上最大的高温超导磁体，这标志着我国超导技术基本达到国际先进水平，并在国际率先实现完整超导变电站系统的运行[27]。

中、大功率（1—10 MW/10—50 MJ 级）是超导储能系统的研发方向，其关键技术包括超导材料技术、低温制冷技术、超导限流技术、功率变换调节技术和系统动态监控技术等。

2.1.5 物理储热

根据储热形式，物理储热可分为显热储热和潜热储热技术。其中，显热储热技术储能密度低、体积大、温度输出波动大、成本低、装置结构简单、技术成熟，已有商业化产品；潜热储热技术具有储能密度高、体积小、温度输出平稳等优点，但循环寿命有待提升，正处于低温、小规模示范应用阶段，是目前的研究热点[28]。表 6 为物理储热技术特征，可广泛应用于能源网络的“削峰填谷”、风电储存利用、太阳能热发电、工业余热利用、交通运输过程中的温度自调控、建筑物温度自调节、电厂余热回收及微型和智能电网等领域。

显热储热材料可分为低温、中温和中高温储热材料。水的比热大，主要用于低温储热；导热油、硝酸盐的沸点比较高，常用于中温储热；镁砖、混凝土、熔融盐等是主要的中高温储热材料；高温混凝土已应用在太阳能热发电等领域[29]。2013 年，美国阿肯色大学开发出可耐 500℃ 的中高温新型混凝土；同年，国家电网公司在北京建成首个采用镁砖为蓄热材料的集中电采暖试点示范项目，工作温度范围 150℃—500℃。

潜热储热材料可分为常低温、中温和中高温相变材料[30]。常低温相变材料主要包括聚乙二醇、石蜡和脂肪酸等有机物及无机水合盐，中温相变材料主要包括硝酸盐等无机盐和有机糖醇等有机材料，中高温相变材料主要包括氟化物、氯化物和盐酸盐等无机盐、金属和合金等[31]。德国 ZAE 公司采用沸石为相变储热材料，建成 4 MWh 移动储热供热装置。江苏启能新能源材料有限公司采用相变温度为 95℃ 的水合盐相变储热技术实现供暖，储热容量为 12 MWh。新疆阿勒泰市风电清洁供暖示范项目采用南京金合能源材料有限公司的相变储热砖，储热密度超过 835 kJ/kg 和 1680 MJ/m^3。综上，相变储热技术具有储能密度高、体积小、温度输出平稳等优点，但循环寿命有待提升，随着国内电能替代的发展需要，目前已经成为研究热点。

2.2 国内外技术发展差距

虽然我国政府对储能愈来愈重视，但是经过多方数据调研，由于发展较晚，整体上我国储能技术与国际还有较大的差距（图 3）。除新型压缩空气储能系统外，国际上其他物理储能技术都处在应用或推广

表 6　物理储热技术特征

储热形式	储能密度（kJ/kg）	储能期限	典型储热介质	技术应用现状
显热储热	10—600	分钟—天	熔融盐、镁砖、导热油、水、混凝土等	已商业化
潜热储热	100—1000	分钟—天	熔融盐、石蜡、金属和合金等	接近商业化

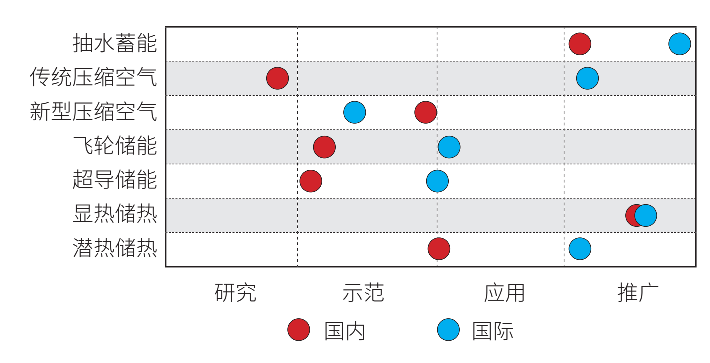


图 3　国内外储能技术发展阶段比较

阶段，而我国只有抽水蓄能和显热储热技术实现了推广，其他物理储能技术均处在示范与研发阶段。

国内外储能技术指标的比较见图 4。在规模方面，除新型压缩空气储能外，其他储能技术的规模较国外仍有一定的差距，特别是传统压缩空气储能、飞轮储能和超导储能；在效率方面，除新型压缩空气储能外，其他储能技术的效率均低于国外水平；在寿命方面，国内飞轮储能和超导储能技术寿命远低于国外水平。

3 国内外物理储能政策现状

3.1 美国政策

美国储能技术的快速发展与政府政策密不可分。这些政策覆盖了产业发展规划、电价激励、设备投资激励、示范项目激励等方面。其中，产业发展规划政策主要有《美国加州储能激励法案》、美国能源部“SunShot 计划”等；电价激励政策主要有联邦能源管理委员会 745 号令、755 号令、784 号令、792 号令等；设备投资激励政策主要包括“自发电系统激励计划”等；示范项目激励政策主要有《美国复苏与再投资法案》等。整体而言，美国政策具备全面性和可持续发展性，并辅以大规模的政府资金支持。

3.2 日本政策

日本储能政策主要包括产业发展规划、电价激励、可再生能源发展、分布式能源系统发展、设备投资激励政策等。其中，产业发展规划政策主要包括“日光计划”“月光计划”“新日光计划”等；电价激励政策主要有抽水蓄能的推动政策等；可再生能源发展政策主要包括电力企业采购可再生能源电力的特别措施法、电力公用事业的经营者采购可再生能源的特别措施法等；分布式能源系统发展政策主要有《节能法修正案》；设备投资激励政策主要有锂离子电池储能补贴政策。整体而言，日本政策具有前瞻性、全面性、高效性和可持续性的特点。

3.3 德国政策

德国储能政策主要包括产业发展规划、电价激励、设备投资、可再生能源发展政策。其中，产业发展规划政策有“第六次能源研究计划”；电价激励政策有“自消费”税；设备投资激励政策有德国光伏储能补贴政策；可再生能源发展政策有《可再生能源法

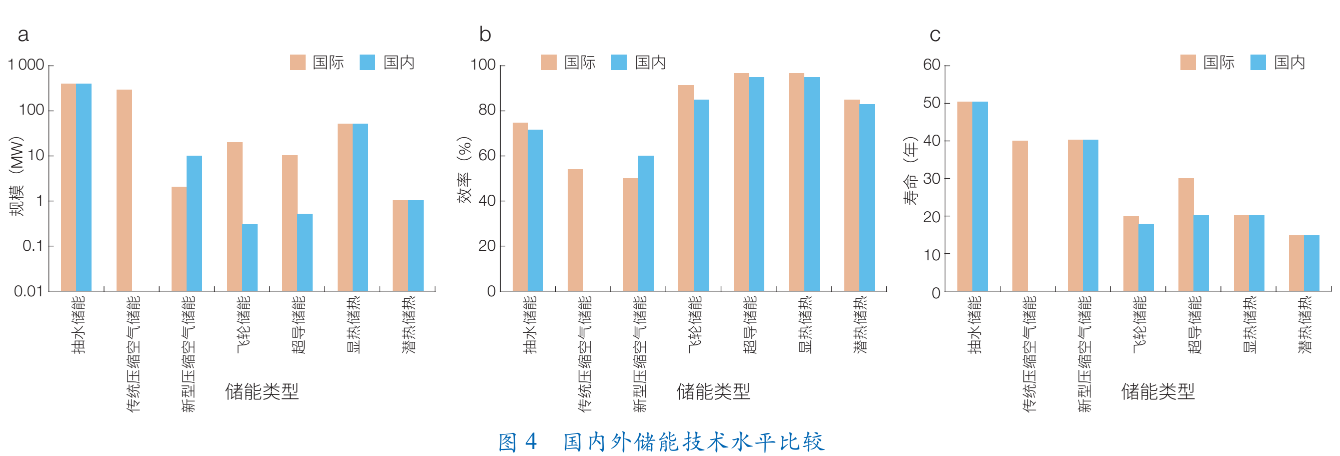


图 4　国内外储能技术水平比较

（a）规模；（b）效率；（c）寿命

案》。整体而言，德国政策具备针对性和高效性。

3.4 中国政策

国内储能政策主要停留在指导层面，虽然近些年出台了若干促进可再生能源发展、分布式光伏发展、电力体制改革的政策，加大了对储能技术研发的重视程度，但并没有针对储能产业机制系统的方案。因此，需要结合国内市场特点，借鉴国外先进经验，制定出符合我国国情要求，促进储能产业稳定、长远、健康发展的政策。

4 我国物理储能技术发展问题与挑战

4.1 技术方面

关键技术难题。从技术角度来看，影响储能技术规模化应用的重大技术瓶颈还有待解决，比如大型抽水蓄能机组国产化程度较低，100 MW 级及以上压缩空气储能中高负荷压缩机和膨胀机技术尚未完全掌握；飞轮储能的高速电机、高速轴承和高强度复合材料等关键技术尚未突破；超导储能系统的高温超导材料和超导限流技术等尚未突破等。

技术路线难题。从技术路线角度来看，除抽水蓄能外的物理储能技术正处在关键时期：一方面技术亟待应用检验，另一方面应用侧在选择不同技术时又倍感困惑。这对技术的不断创新提出了更高要求，迫切需要明确相关物理储能技术发展路线，对其发展提供指导。

4.2 政策方面

标准体系缺失。相关配套管理规范和技术标准缺失，一定程度上导致并网发电企业对储能技术的应用缺乏内在动力。在产品方面，应建立强制性认证机制，走“先标准、后制造”之路，为储能产业的发展提供政策保障。

激励政策不够完备。目前无论是工商业用户还是居民用户，“峰谷电价”等政策的缺失使得用户端缺乏对储能应用的热情和动力。而且现阶段我国只有对可再生能源发电的上网电价政策，没有针对与可再生能源配套的储能部分的鼓励政策。此外，由于示范应用的成本较高，如不制定合理的示范项目激励政策，很难推动储能系统的商业化运行。

5 建议

（1）加强储能规模化应用关键技术的持续支持力度，针对多种应用，鼓励并行发展具有不同技术特征的多种储能技术。对具有重大应用前景、国内已开展基础研究但尚未掌握的新型储能技术，通过持续支持，使其尽快达到示范验证水平。对已获支持的储能技术，在充分评估下，对于确实有重大应用前景、进展良好、技术成熟度较高的技术，进一步强化支持，突破瓶颈技术，推进相关技术向产业化和商业化发展。

（2）制定我国物理储能技术发展路线，包含近、中、长期规划，作为中国储能产业发展的目标性指导文件。近期规划应明确重点发展的技术类别、确立示范项目资金支持和应用方向；中、长期规划应确立规模、发展目标、资金投入、技术方向、应用类型的计划并持续修正完善，使技术的发展有序、有重点、有目标。

（3）出台储能示范项目相关配套管理规范和技术标准，建立强制性认证机制。规范储能产品规格和性能，推动储能产品规范化生产和示范项目的标准化建设，促进储能产品和行业的健康发展。

（4）出台分布式储能应用的鼓励办法、储能技术和产业发展相关的激励政策等。增加储能的应用领域，为储能建立价格机制、硬件设施投运机制、示范应用项目承担机制，促进储能产业发展。

参考文献

1 International Energy Agency. World Energy Outlook 2018. Paris: International Energy Agency, 2019.

2 U S Energy Information Administration. International Energy Outlook 2018. Washington D C: U S Energy Information Administration, 2018.

3 习近平主持召开中央财经领导小组第六次会议. [2014-06-13]. http://www.xinhuanet.com/video/2014-06/13/c_126616850.htm.

4 刘英军, 刘畅, 王伟, 等. 储能发展现状与趋势分析. 中外能源, 2017, 22(4): 80-88.

5 国家发展改革委, 财政部, 科学技术部, 等. 五部门关于促进储能技术与产业发展的指导意见. [2017-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-10/11/content_5231130.htm.

6 Akinyele D O, Rayudu R K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 8: 74-91.

7 Luo X, Wang J, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.

8 Hassan N, Mariah B, Bolivar O F J, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 491-523.

9 Chen H, Cong T N, Yang W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 2009, 19: 291-312.

10 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势. 科学通报, 2017, 62(15): 54-62.

11 Mahlia T M I, Saktisahdan T J, Jannifar A, et al. A review of available methods and development on energy storage; technology update. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33(33): 532-545.

12 中关村储能产业技术联盟. 全球储能市场跟踪报告（2018.Q4）摘要版. [2019-02-15]. https://www.sohu.com/a/295083491_319518?sec=wd&spm=smpc.author.fd-.18.1552381146500OB3gqXJ.

13 周学志, 徐玉杰, 谭雅倩, 等. 小型抽水蓄能技术发展现状及应用前景. 中外能源, 2017, 22(8): 87-93.

14 谭雅倩, 周学志, 徐玉杰, 等. 海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 35-42.

15 Conner A M, Rinehart B N, Francfort J E. U S Hydropower Resource Assessment. Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 1998.

16 Zhang X, Xu Y, Zhou X, et al. A near-isothermal expander for isothermal compressed air energy storage system. Applied Energy, 2018, 225: 955-964.

17 纪律, 陈海生, 张新敬, 等. 压缩空气储能技术研发现状及应用前景. 高科技与产业化, 2018, 263(4): 54-60.

18 Aneke M, Wang M. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. Applied Energy, 2016, 179: 350-377.

19 Guo C, Xu Y, Guo H, et al. Comprehensive exergy analysis of the dynamic process of compressed air energy storage system with low-temperature thermal energy storage. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 684-693.

20 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十年评述. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 765-782.

21 Mousavi G S M, Faraji F, Majazi A, et al. A comprehensive review of flywheel energy storage system technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 477-490.

22 唐长亮, 张小虎, 孟祥梁. 国外飞轮储能技术状况研究. 中外能源, 2018, 23(6): 82-86.

23 陈磊, 王亮, 林曦鹏, 等. 飞轮储能热管理研究现状分析. 中外能源, 2019, 24 (2): 84-91.

24 Kreeumporn W, Ngamroo I. Optimal superconducting coil integrated into PV generators for smoothing power and regulating voltage in distribution system with PHEVs. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 5402805.

25 Francisco D, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, et al. A review

of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.

26 Li R, Xu Y, Zuo W, et al. Development of a movable HTS SMES system. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4): 5701109.

27 郭文勇, 蔡富裕, 赵闯, 等. 超导储能技术在可再生能源中的应用与展望. 电力系统与自动化, 2019, 43: 1-13.

28 Zalba B, Marin J M A, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3): 251-283.

29 冷光辉, 蓝志鹏, 葛志伟, 等. 储热材料研究进展. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 119-130.

30 杨才红, 张健, 薛林, 等. 相变材料的研究进展及应用. 节能, 2016, (12): 23-26.

31 Zhang P, Xiao X, Ma Z W. A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. Applied Energy, 2016, 165: 472-510.

Physical Energy Storage Technology in Energy Revolution

CHEN Haisheng[1,2*] LING Haoshu[1] XU Yujie[1,2]

（1 Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Promoting the healthy development of energy storage technology and industry has great strategic significance on increasing the proportion of renewable energy, ensuring energy security, improving energy efficiency, and promoting the energy revolution. As one of the most important technologies, physical energy storage technology has received extensive attention. In this study, the major needs of physical energy storage technology are analyzed, and the development status and trends of five types of physical energy storage technologies and industry are summarized. Then the development problems and challenges of these physical energy storage technologies are confirmed, and corresponding recommendations are put forward. The study aims at providing a detailed reference for the research and development of physical energy storage technology and industry in China.

Keywords energy storage, physical energy storage, pumped hydro storage, compressed air energy storage, flywheel energy storage, superconducting magnetic energy storage, physical thermal energy storage



陈海生 中国科学院工程热物理所副所长，国家能源大规模物理储能研发中心主任。先后入选中国科学院“百人计划”，英国能源学会会士，中组部首批“万人计划——青年拔尖人才计划”、首批“万人计划——中青年科技创新领军人才计划”；获国家自然科学基金委“国家优秀青年科学基金”等。主要从事新型压缩空气储能系统、叶轮机械内部流动、限定空间尺度的流动与传热等工作。发表论文300余篇，其中SCI收录120余篇，EI收录150余篇，SCI他引4 500余次，入选2014—2018年“Elsevier中国高被引学者

*Corresponding author

榜单”。兼任 *Journal of Thermal Science* 等 4 个学术期刊副主编、7 个学术期刊编委，中国能源研究会储能专委会主任，中国化工学会储能专委会副主任，中国物理与化学电池协会储能专委会副主任，中关村储能技术与产业联盟理事长等。E-mail: chen_hs@iet.cn

CHEN Haisheng Deputy Director of Institute of Engineering Thermophysics (IET), Chinese Academy of Sciences (CAS) and Director of China National Research Centre of Physical Energy Storage. He joined IET-CAS as an "Hundred Talents Program" professor. He is the Fellow of Energy Institute, UK. He is also the member of "Ten Thousand Talent Plan—Young Top-notch Talent Program", "Ten Thousand Talent Plan—Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Leading Talents Program", "National Science Fund for Excellent Young Scholars", etc. He has been working on fluid dynamics, heat transfer, and system analysis related to energy storage and power engineering. More specifically, his research includes compressed air energy storage, thermal energy storage, and internal flow of turbomachinery. His research has led to 300+ papers, in which 120+ of them are indexed by SCI and 150+ of them are indexed by EI, 9 book chapters, and 140+ patents. The publications have received 4500+ citations excluding self citations, according to science citition index (SCI), Web of Science. He has been the member of Chinese Most Cited Researchers since 2014. He acts as the Associate Editor-in-Chief of 4 peer reviewed journals such as *Journal of Thermal Science*, the committee member/session chair of 8 international conferences, and editorial board member for 7 peer reviewed journals. Currently, he also serves as director of Energy Storage Committee of China Energy Research Society, deputy director of Energy Storage Committee of the Chemical Industry and Engineering Society of China, deputy director of Energy Storage Committee of China Industrial Association of Power Sources, director of China Energy Storage Alliance, etc. E-mail: chen_hs@iet.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 International Energy Agency. World Energy Outlook 2018. Paris: International Energy Agency, 2019.

2 U S Energy Information Administration. International Energy Outlook 2018. Washington D.C.: U S Energy Information Administration, 2018.

3 习近平主持召开中央财经领导小组第六次会议. [2014-06-13]. http://www.cntheory.com/zycjwyhlchy/zycjldxzhy/202110/t20211008_20162.html.

Xi Jinping presided over the sixth meeting of the Central Financial and Economic Leading Group. [2014-06-13]. http://www.cntheory.com/zycjwyhlchy/zycjldxzhy/202110/t20211008_20162.html. (in Chinese)

4 刘英军, 刘畅, 王伟, 等. 储能发展现状与趋势分析. 中外能源, 2017, 22(4): 80-88.

Liu Y J, Liu C, Wang W, et al. Analysis of development status and trend of energy storage technology. Sino-Global Energy, 2017, 22(4): 80-88. (in Chinese)

5 国家发展改革委, 财政部, 科技部, 等. 五部门关于促进储能技术与产业发展的指导意见. [2017-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-10/11/content_5231130.htm.

National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Five departments' guiding opinions on promoting the development of energy storage technology and industry. [2017-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-10/11/content_5231130.htm. (in Chinese)

6 Akinyele D O, Rayudu R K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 8: 74-91.

7 Luo X, Wang J H, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.

8 Hassan N, Mariah B, Bolivar O F J, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 491-523.

9 Chen H S, Cong T N, Yang W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.

10 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势. 科学通报, 2017, 62(15): 1602-1610.

Wang X, Chen H S, Xu Y J, et al. Advances and prospects in thermal energy storage: A critical review. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(15): 1602-1610. (in Chinese)

11 Mahlia T M I, Saktisahdan T J, Jannifar A, et al. A review of available methods and development on energy storage; Technology update. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 532-545.

12 中关村储能产业技术联盟. 全球储能市场跟踪报告（2018.Q4）摘要版. [2019-02-15].https://www.china5e.com/news/news-1051665-1.html .

China Energy Storage Alliance. Global energy storage market tracking report (2018.Q4) Summary Edition. [2019-02-15]. https://www.china5e.com/news/news-1051665-1.html . (in Chinese)

13 周学志, 徐玉杰, 谭雅倩, 等. 小型抽水蓄能技术发展现状及应用前景. 中外能源, 2017, 22(8): 87-93.

Zhou X Z, Xu Y J, Tan Y Q, et al. Development status and application prospects of small-scale pumped hydro energy storage technology. Sino-Global Energy, 2017, 22(8): 87-93. (in Chinese)

14 谭雅倩, 周学志, 徐玉杰, 等. 海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 35-42.

Tan Y Q, Zhou X Z, Xu Y J, et al. Seawater pumped hydro energy storage: Review and perspectives. Energy Storage

Science and Technology, 2017, 6(1): 35-42. (in Chinese)

15 Conner A M, Rinehart B N, Francfort J E. U S Hydropower Resource Assessment. Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 1998.

16 Zhang X J, Xu Y J, Zhou X Z, et al. A near-isothermal expander for isothermal compressed air energy storage system. Applied Energy, 2018, 225: 955-964.

17 纪律, 陈海生, 张新敬, 等. 压缩空气储能技术研发现状及应用前景. 高科技与产业化, 2018, (4): 52-58.

Ji L, Chen H S, Zhang X J, et al. Research and development status and application prospect of compressed air energy storage technology. High-Technology & Commercialization, 2018, (4): 52-58. (in Chinese)

18 Aneke M, Wang M H. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. Applied Energy, 2016, 179: 350-377.

19 Guo C, Xu Y J, Guo H, et al. Comprehensive exergy analysis of the dynamic process of compressed air energy storage system with low-temperature thermal energy storage. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 684-693.

20 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十年评述. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 765-782.

Dai X J, Wei K P, Zhang X Z, et al. A review on flywheel energy storage technology in fifty years. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 765-782. (in Chinese)

21 Mousavi G S M, Faraji F, Majazi A, et al. A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 477-490.

22 唐长亮, 张小虎, 孟祥梁. 国外飞轮储能技术状况研究. 中外能源, 2018, 23(6): 82-86.

Tang C L, Zhang X H, Meng X L. Research on flywheel energy storage technology abroad. Sino-Global Energy, 2018, 23(6): 82-86. (in Chinese)

23 陈磊, 王亮, 林曦鹏, 等. 飞轮储能热管理研究现状分析. 中外能源, 2019, 24 (2): 84-91.

Chen L, Wang L, Lin X P, et al. Analysis on research status of thermal management of flywheel energy storage system. Sino-Global Energy, 2019, 24 (2): 84-91. (in Chinese)

24 Kreeumporn W, Ngamroo I. Optimal superconducting coil integrated into PV generators for smoothing power and regulating voltage in distribution system with PHEVs. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.

25 Francisco D, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.

26 Li R, Xu Y, Zuo W P, et al. Development of a movable HTS SMES system. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4): 1-9.

27 郭文勇, 蔡富裕, 赵闯, 等. 超导储能技术在可再生能源中的应用与展望. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 2-14.

Guo W Y, Cai F Y, Zhao C, et al. Application and prospect of superconducting magnetic energy storage for renewable energy. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43: 1-13. (in Chinese)

28 Zalba B, Marin J M A, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3): 251-283.

29 冷光辉, 蓝志鹏, 葛志伟, 等. 储热材料研究进展. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 119-130.

Leng G H, Lan Z P, Ge Z W, et al. Recent progress in thermal energy storage materials. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 119-130. (in Chinese)

30 杨才红, 张健, 薛林, 等. 相变材料的研究进展及应用. 节能, 2016, 35(12): 23-26.

Yang C H, Zhang J, Xue L, et al. The research progress and

application of phase change materials. Energy Conservation, 2016, 35(12): 23-26. (in Chinese)

31 Zhang P, Xiao X, Ma Z W. A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. Applied Energy, 2016, 165: 472-510.